

플라즈마 화학기상증착법을 이용한 비정질 규소 및 질화규소의 저온성막 연구

이호년^{1*}

Low-Temperature Processing of Amorphous Silicon and Silicon-Nitride Films Using PECVD Method

Ho-Nyeon Lee^{1*}

요약 150℃의 저온에서 플라즈마 화학기상증착 (PECVD) 방법으로 비정질 규소 및 질화규소 박막을 성막 하였다. 비정질 질화규소 박막은 소스 가스의 수소 분율을 증가시키에 따라 굴절률이 1.9에 접근하고 질소-수소 결합이 주동적이 되어 고온성막한 박막에 버금가는 특성을 보였다. 비정질 규소 박막은 소스 가스의 수소 분율을 높임에 따라 굴절률과 광학적 금지대역의 크기가 고온 성막된 박막의 값인 4.2와 1.8 eV에 근접한 값을 가지게 되었으며, $[\text{Si-H}]/([\text{Si-H}]+[\text{Si-H}_2])$ 의 값이 증가하여 양질의 박막특성을 얻을 수 있었다. RF 전력 및 증착 압력에 대해서 낮은 전력과 작은 압력에서 양질의 박막을 얻을 수 있었으며, 박막 특성은 RF 전력 보다는 증착 압력의 변화에 대해서 좀 더 큰 의존성을 보였다. 박막트랜지스터 제작에 적용 가능한 양질의 비정질 규소 및 질화규소 박막을 저온에서 얻기 위해서는 소스 가스의 수소 분율을 높게 하는 것이 중요한 공통 인자로 파악되었다.

Abstract Amorphous silicon and silicon-nitride films were deposited using plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) method at 150℃. As fraction of H₂ in source gas was increased, characteristics of low-temperature silicon-nitride films approached those of conventional high-temperature films; the refractive index approached 1.9 and the ratio of nitrogen-hydrogen bonds to silicon-hydrogen bonds increased. And also, as fraction of H₂ in source gas was increased, characteristics of low-temperature silicon films approached those of conventional high-temperature films; refractive index and optical band gap approached 4.2 and 1.8 eV, and $[\text{Si-H}]/([\text{Si-H}]+[\text{Si-H}_2])$ increased. Lower RF power and process-pressure made the amorphous silicon films to be better properties. Increase of H₂ ratio seemed as the common factor to get reliable amorphous silicon and silicon-nitride films for thin-film-transistors (TFTs) at low temperature.

Key Words : amorphous, silicon, silicon-nitride, low-temperature, plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD)

1. 서론

수소화된 비정질 규소(hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H)) 박막트랜지스터(thin-film transistor (TFT))는 평판디스플레이의 능동형 스위칭소자로서 널리 사용되고 있다. 특히, 현재 평판디스플레이의 대체를 이루고 있는 능동형 액정디스플레이(active-matrix liquid-crystal

display(AMLCD))의 제작에 있어서는 필수 요소라고 할 수 있다. 통상적으로 사용되는 a-Si:H TFT 어레이는 유리 기판 위에 제작되며 공정온도는 대개 300℃ 내외이고 5 개 내외의 포토마스크 공정이 사용된다. 통상적인 조건에서 제작된 a-Si:H TFT의 전체효과이동도는 대략 1.0 cm²/V·sec 이하이고, 오프상태의 전류는 상당히 낮다. 스위칭율 (온상태의 전류/오프상태의 전류)은 대개 10⁶ 이상으로 상당히 큰 값을 보인다. 또한, 광감응성 (photosensitivity)이 크고, 바이어스전압 인가에 의해서 쉽게 열화 되는 특성을 보인다[1-3].

디스플레이 산업이 발전하고 디스플레이 소자의 응용

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-02) 지원으로 수행되었음

¹순천대학교 전자정보공학과

*교신저자: 이호년(hnlee@sch.ac.kr)

치가 늘어짐에 따라서 다양한 형태의 디스플레이에 대한 요구가 늘고 있다. 특히, 휴대에 편리하면서 파손에도 강한 특성을 가질 수 있는 플렉시블 디스플레이에 대한 관심이 고조되고 있으며 이에 대한 연구도 활발해 지고 있다[4,5]. 통상적인 디스플레이 소자에 사용되는 유리 기판으로는 굽힐 수 있는 소자를 제작할 수 없기 때문에 플렉시블 디스플레이의 제작을 위해서는 플라스틱 등 유연성을 가진 기판을 적용하는 것이 필요하다. 이에 따라 디스플레이용 플라스틱 기판에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나 충분한 성과를 거두지 못하였다[6,7]. 플라스틱 기판의 특성 중에 특히 문제가 되는 것은 기판의 내열성이다. 대부분의 투명한 플라스틱 기판은 200℃ 이상의 온도를 견디지 못한다[7,8]. 능동형 디스플레이를 만들기 위해서는 TFT를 기판에 형성해야 한다. 그러나 규소 반도체를 이용하여 만들어지는 현재의 TFT는 공정온도가 200℃ 이상이기 때문에 플라스틱 기판의 적용이 어렵다. 기존의 규소 반도체 소자 중에 가장 공정온도가 낮은 비정질 규소 TFT의 경우도 300℃ 이상의 온도가 필요하다.

플렉시블 디스플레이에 적용 가능한 TFT를 만들기 위해서는 비정질 규소 TFT의 공정 온도를 낮추어야 한다. 특히, 플라스틱 기판을 이용하여 원활한 공정 진행을 하기 위해서는 150℃ 이하의 공정온도를 가져야 하는데, 최근의 플라스틱 기판 기술의 발전에 따라서 향후 200℃까지의 공정온도도 원활히 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 비정질 규소 TFT의 성능을 결정하는 것은 비정질 규소로 만들어지는 활성층과 비정질 질화규소로 만들어지는 게이트 절연막의 특성이다. 저온에서 증착하면서 TFT의 성능을 유지하기 위해서 새로운 증착공정을 도입하거나 공정가스의 분율을 변화하거나 불활성 가스를 도입하는 등의 노력이 있어 왔다[9-11]. 저온에서 제작된 TFT의 특성이 통상적으로 사용되는 TFT의 특성과 유사한 결과를 얻은 경우도 있으나 신뢰성 등의 문제가 완전히 해결되지는 않아서 실제 적용에 이르지 못하는 못하고 있다.

유리 기판을 사용하여 제작되는 기존의 비정질 규소 TFT의 경우는 증착 공정 온도가 300℃ 전후로 최적화되어 있다. 플렉시블 디스플레이의 실현을 위해서는, 공정 온도를 플라스틱 기판의 사용이 용이한 150℃로 낮추어서 현재의 최적화되어 있는 수준의 특성을 얻는 것이 중요하다. 이 연구에서는 기존에 통상적으로 쓰이고 있는 plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) 방법과 공정 가스를 사용하고 150℃의 증착온도에서 각종 공정계수를 변화시켜서 최적의 비정질 규소 활성층 및 비정질 질화규소 게이트 절연막층의 성막 조건을 찾고자 하였다.

2. 실험방법

이 연구에서는 박막의 증착온도를 150℃로 고정하고 각종 증착 계수를 변경시켜 박막의 특성변화를 분석하였다. 박막증착에는 AMLCD용의 TFT 제작에 통상적으로 쓰이는 PECVD 방법을 사용하였다. 플라즈마의 발생에는 13.56 MHz의 RF 소스가 사용 되었고 드라이 펌프를 이용하여 진공을 형성하였다. 드라이 펌프를 사용하면 10^{-3} torr 정도의 베이스프레셔를 얻을 수 있는데, 박막트랜지스터에 사용하기 위한 비정질 규소 및 질화규소를 성막하는 조건으로는 충분한 것으로 알려져 있다. 공정 가스는 일반적인 비정질 규소 박막 및 비정질 질화규소 박막의 제작에 사용되는 SiH_4 , H_2 , NH_3 , N_2 등의 가스를 사용하였다. 증착온도는 플라스틱 기판을 적용할 수 있는 정도이지만 실험의 용이성을 고려하여 0.7 mm 두께의 유리 기판을 사용하였다.

활성층 및 게이트 절연막의 특성을 평가하기 위하여 굴절률, 응력, 수소결합 비율, 원자 조성, 광학적 금지대역 등을 측정 하였다. 굴절률 및 광학적 금지대역은 자외선-가시광 투과 특성을 측정하여 추출 하였다[12]. 응력은 Tencor의 장비를 이용하여 박막 증착 전후의 기판 곡률의 변화를 측정하여 추출하였다. 수소결합 비율은 fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)을 측정하여 추출하였다[13]. 원자 조성은 x-ray photoemission spectroscopy (XPS)를 측정하여 분석 하였다.

3. 실험 결과 및 토의

그림 1은 수소의 분율에 대한 질화규소막의 특성 데이터이다. 증착온도는 150℃ 이었으며, 증착 압력은 1.2 torr 이었고, SiH_4 , NH_3 , N_2 의 유량비는 1.5:16 이었다. 인가된 RF 전력밀도는 약 0.75 W/cm^2 이었다. 그림 1(a)은 수소분율에 따른 굴절률의 변화를 보여주고 있다. 일반적으로, 비정질 규소 TFT에 사용되는 게이트 절연막으로서의 질화규소는 굴절률이 1.9 정도일 때 좋은 소자특성을 보여주는 것으로 알려져 있다[14,15]. 결과에서 보여주듯이 수소의 분율이 증가함에 따라 굴절률이 1.9에 근접해 가는 것을 알 수 있다. 그림 1(b)은 수소분율에 대한 응력의 변화를 보여주고 있다. 수소분율이 증가함에 따라 응력이 커지는 것을 알 수 있다. 그림 1(c)는 규소-수소 결합 대비 질소-수소 결합의 비율($[\text{N-H}]/[\text{Si-H}]$)을 보여주고 있다. 수소 분율이 증가함에 따라 질소-수소 결합이 주된 결합이 되는 것을 볼 수 있다. 그림 1(d)는 수소 분율에 대응하여 박막내의 규소 및 질소의 함량을 원자%로

보여주고 있다. 수소 분율의 변화에도 불구하고 규소 및 질소의 함량에는 별다른 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 그림 1(e)는 수소 분율에 대응하는 광학적 금지대역의 크기를 보여준다. 수소 분율 변화에도 불구하고 광학적 금지대역의 크기는 변화가 없는 것을 볼 수 있다.

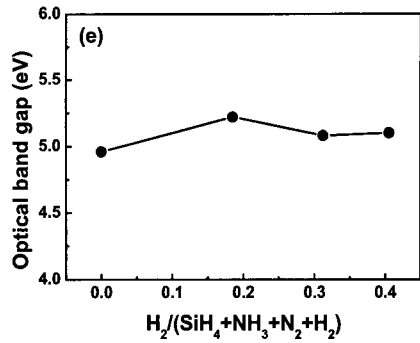
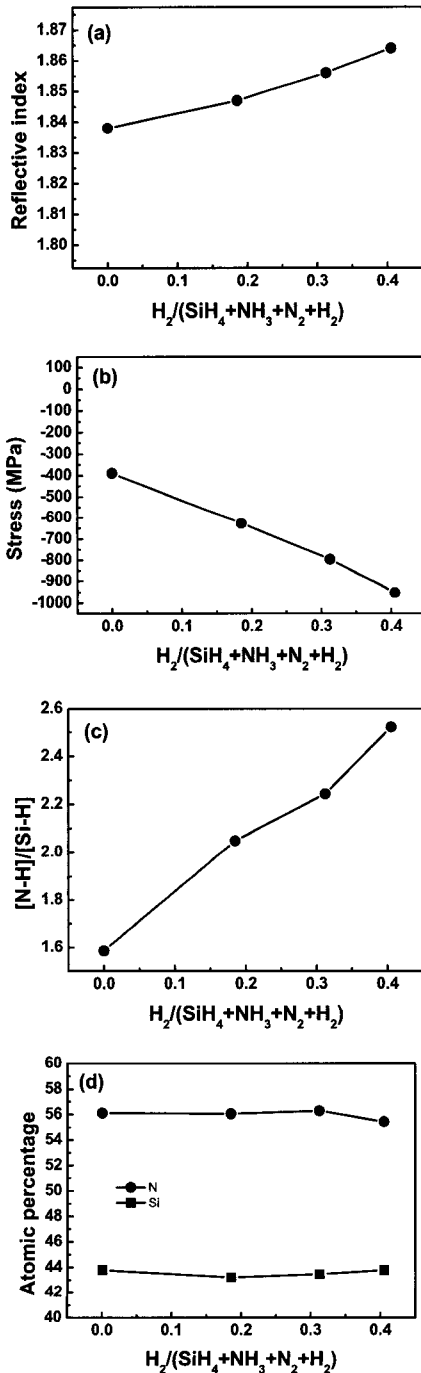


그림 1. 수소의 분율에 대한 질화 규소막의 특성: (a) 굴절률, (b) 응력, (c) 규소-수소 결합 대비 질소-수소 결합 비율, (d) 질소 및 규소의 박막내 함량, (e) 광학적 금지대역.

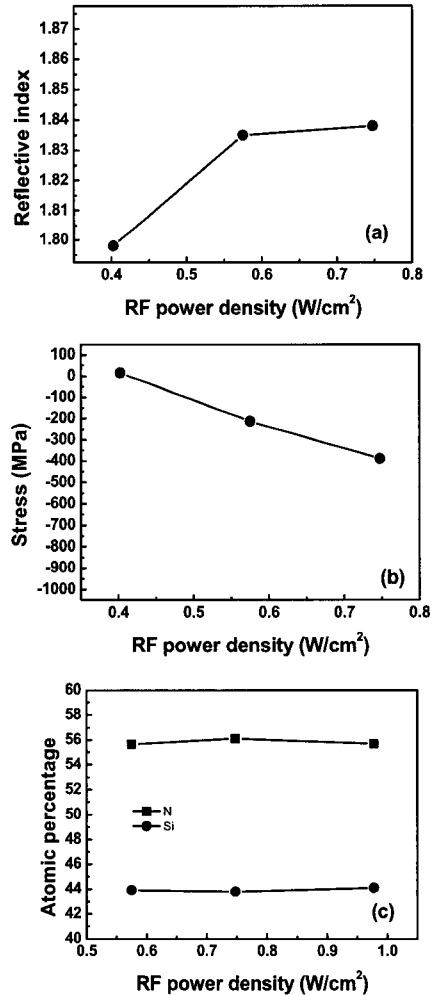


그림 2. RF 전력밀도의 변화에 대비한 질화 규소막의 특성: (a) 굴절률, (b) 응력, (c) 질소 및 규소의 박막내 함량.

그림 2는 RF 전력밀도의 변화에 대비한 질화규소막의 특성 데이터이다. 여기에서 증착온도는 150°C 이었으며, 증착 압력은 1.2 torr 이었고, SiH₄, NH₃, N₂ 의 유량비는 1:5:16 이었으며 H₂ 가스는 사용하지 않았다. 그림 2(a)는 RF 전력밀도에 대응하는 굴절률을 보여주고 있는데, 약 0.6 W/cm² 이상에서 포화되는 모습을 보인다. 그림 2(b)는 RF 전력밀도에 대응하는 응력의 변화를 보여주고 있는데, RF 전력이 증가함에 따라 응력도 커지는 양상을 보인다. 그림 2(c)는 인가된 RF 전력밀도에 대응하는 박막 내의 규소 및 질소의 함량을 원자%로 보여주고 있다. 인가전력의 변화에도 불구하고 별다른 변화가 없는 것을 볼 수 있다.

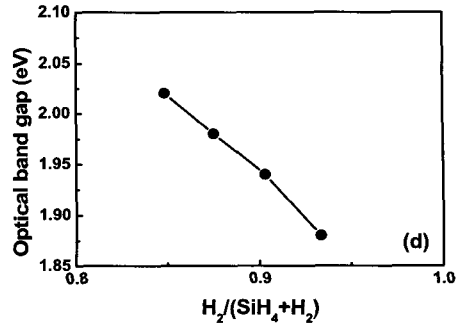
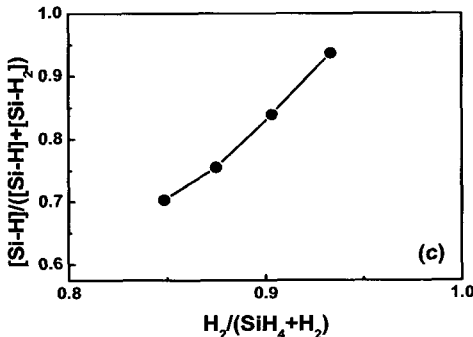
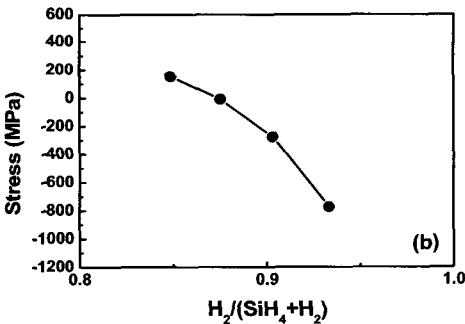
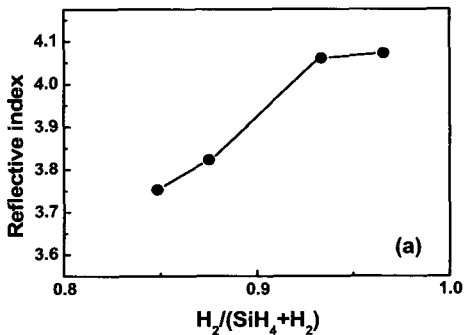


그림 3. 수소의 분율에 대한 수소화된 비정질 규소막의 특성; (a) 굴절률, (b) 응력, (c) Si-H 결합 대비 Si-H 결합의 비율, (d) 광학적 금지대역.

그림 3은 수소의 분율에 대한 수소화된 비정질 규소막의 특성 데이터이다. 증착온도는 150°C 이었으며, 증착 압력은 1.2 torr, 인가된 RF 전력밀도는 약 0.09 W/cm² 이었다. 소스 가스로는 SiH₄와 H₂ 만을 사용하였다. 그림 3(a)는 수소 분율에 대한 굴절률이 변화를 보여주는데, 수소 분율이 증가함에 따라 굴절률이 증가하는 것을 알 수 있다. 일반적인 비정질 Si TFT에 사용되는 규소 박막은 4.2 내외의 굴절률을 가지고 있어서[16], 수소 분율의 증가에 따라 저온에서 증착한 박막도 이와 유사한 특성을 가지게 됨을 알 수 있다. 그림 3(b)는 수소 분율에 대한 응력의 변화를 보여주고 있다. 수소 분율이 증가함에 따라 응력이 커지는 것을 알 수 있다. 그림 2(c)는 Si-H 결합 대비 Si-H 결합의 비율([Si-H]/([Si-H]+[Si-H₂]))을 보여주고 있다. 수소 분율이 증가함에 따라 Si-H 결합이 주도적인 결합이 되는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 양질의 비정질 규소 박막에서는 Si-H 결합이 주도적인 것으로 알려져 있다[17]. 즉, 수소 분율의 증가에 따라 저온에서 증착된 규소박막의 특성이 개선되는 것으로 판단할 수 있다. 그림 3(d)는 수소 분율에 대응하는 광학적 금지대역의 크기를 보여준다. 수소 분율이 증가함에 따라 광학적 금지대역이 감소하고 있다. 일반적인 비정질 규소 TFT에 사용되는 규소 박막의 광학적 금지대역은 1.8 eV 내외의 값을 가지는데, 본 연구의 저온 증착조건에서도 수소분율을 증가함에 따라 광학적 금지대역의 크기가 1.8 eV에 접근함을 알 수 있다.

그림 4는 RF 전력밀도의 변화에 대비한 비정질 규소 박막의 특성 데이터이다. 여기에서 증착온도는 150°C 이었으며, 증착 압력은 1.2 torr 이었고, SiH₄와 H₂ 의 유량비는 5:28 이었다. 그림 4(a)는 RF 전력밀도에 대응하는 굴절률을 보여주고 있는데 RF 전력이 커짐에 따라 굴절률이 감소함을 알 수 있다. 그림 4(b)는 RF 전력밀도에

대응하는 응력의 변화를 보여주고 있는데, RF 전력이 증가함에 따라 응력도 다소 증가하는 양상을 보인다. 그림 4(c)는 인가된 RF 전력밀도에 대응하는 Si-H₂ 결합 대비 Si-H 결합의 비율([Si-H]/([Si-H]+[Si-H₂]))을 보여주고 있다. 그림 4(d)는 RF 전력밀도에 대응하는 광학적 금지대역의 크기를 보여준다. 그림 4(c) 및 (d)에서 보이듯이, Si-H₂ 결합 대비 Si-H 결합의 비율 및 광학적 금지대역의 크기는 RF 전력밀도와 뚜렷한 상관관계를 찾을 수가 없었다.

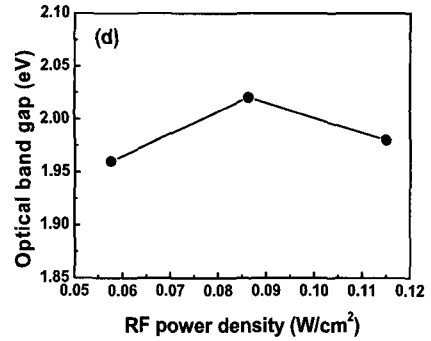
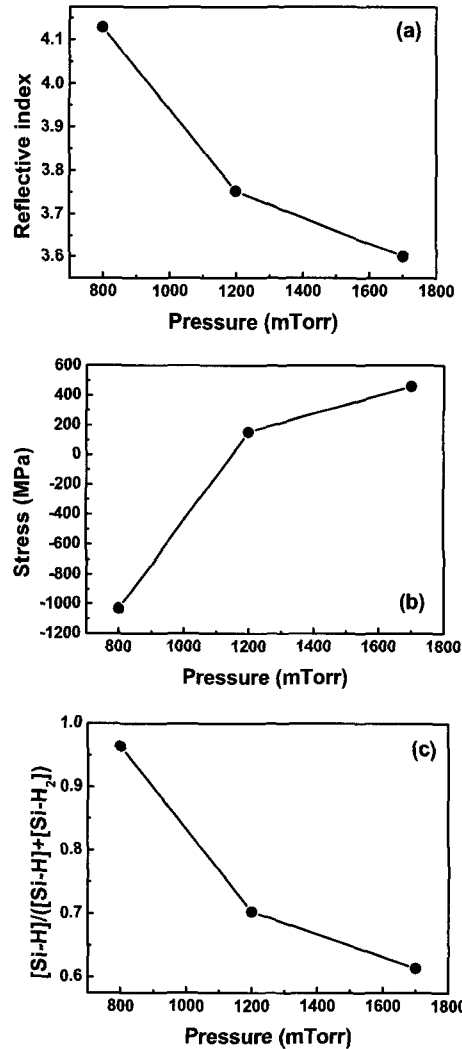
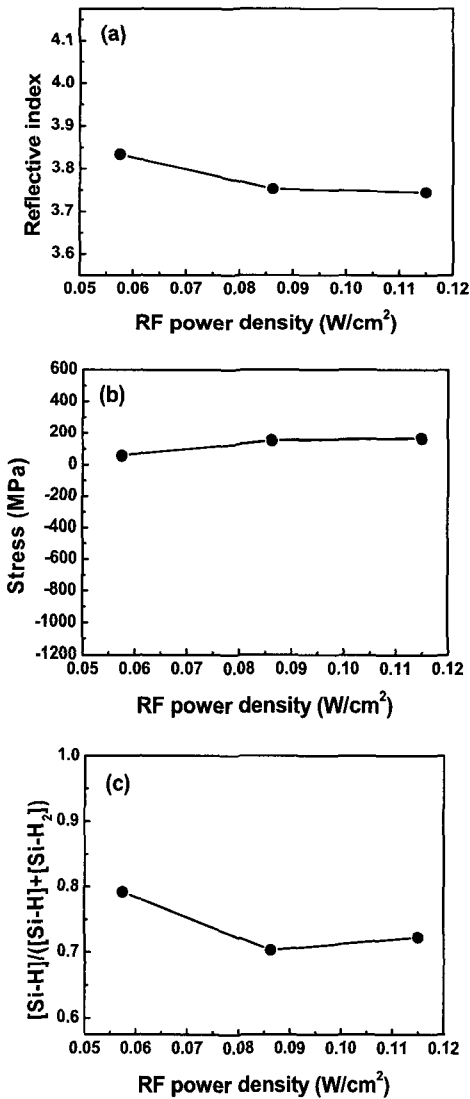


그림 4. RF 전력밀도의 변화에 대비한 비정질 규소박막의 특성; (a) 굴절률, (b) 응력, (c) Si-H₂ 결합 대비 Si-H 결합의 비율, (d) 광학적 금지대역.



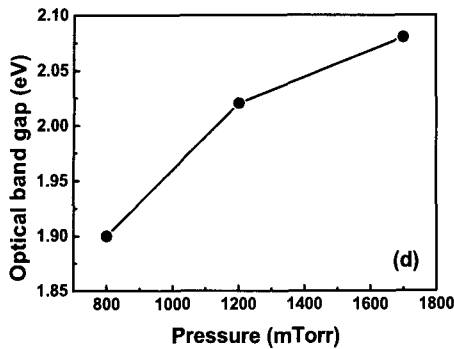


그림 5. 증착 압력의 변화에 대응하는 비정질 규소박막의 특성; (a) 굴절률, (b) 응력, (c) Si-H₂ 결합 대비 Si-H 결합의 비율, (d) 광학적 금지대역.

그림 5는 증착 압력의 변화에 대응하는 비정질 규소박막의 특성 데이터이다. 여기에서 증착온도는 150℃, 인가된 RF 전력밀도는 약 0.09 W/cm², SiH₄와 H₂의 유량비는 5:28이었다. 그림 5(a)는 증착 압력에 대응하는 굴절률을 보여주고 있는데 압력이 증가함에 따라 굴절률이 감소함을 알 수 있다. 그림 5(b)는 증착 압력에 대응하는 응력의 변화를 보여주고 있는데, 압력이 증가함에 따라 응력이 음의 값에서 양의 값으로 급격히 변화하는 것을 알 수 있다. 그림 5(c)는 증착 압력에 대응하는 Si-H₂ 결합 대비 Si-H 결합의 비율([Si-H]/([Si-H]+[Si-H₂]))을 보여주고 있는데, 압력이 증가함에 따라 Si-H 결합의 비율이 빠르게 감소함을 알 수 있다. 그림 5(d)는 증착 압력에 대응하는 광학적 금지대역의 크기를 보여준다. 압력이 증가함에 따라 광학적 금지대역이 증가함을 알 수 있다.

이상에서 비정질 질화규소에 대한 결과를 종합해 보면, 게이트 절연막에 사용될 비정질 질화규소는 소스 가스에서 수소의 함량을 증가시키에 따라 향상된 특성을 보였다. 즉, 비정질 질화규소의 박막특성의 중요한 지표인 굴절률을 1.9에 근접하는 값으로 만들 수 있었으며, 질소-수소 결합의 비율을 증가시킬 수 있었다. 이 두 가지는 양질의 게이트 절연막 제작에 중요한 요소이다. 증착 시에 인가되는 RF 전력이 큰 쪽에서 1.9에 근접하는 굴절률을 얻을 수 있었으나, 수소 분율에 비해서 특성과의 상관관계가 뚜렷하지는 않았다. 결과적으로 양질의 게이트 절연막을 얻기 위해서는 수소 가스의 분율을 높이는 것이 중요하다고 판단된다.

활성층으로 사용될 비정질 규소막의 실험결과를 종합해 보면, 소스 가스에서 수소의 함량을 증가시키에 따라 고온에서 성막 하는 양질의 비정질 규소막에 근접하는 특성을 보였다. 즉, 수소 가스의 분율을 높임에 따라서,

굴절률과 광학적 금지대역의 크기는 고온 박막의 값인 4.2와 1.8 eV에 근접한 값을 가지게 되었으며, [Si-H]/([Si-H]+[Si-H₂])의 값이 증가하여 양질의 박막특성을 얻을 수 있었다. RF 전력 및 증착 압력이 작은 쪽에서 양질의 박막을 얻을 수 있었으며, 증착압력이 좀 더 확실한 의존성을 보여 주었다. 결과적으로 양질의 비정질 규소박막을 얻기 위해서는 수소 가스의 분율을 높이고, RF 전력 및 증착 압력을 낮게 하는 것이 유리한 것으로 판단된다.

4. 결론

플렉시블 디스플레이의 제작이 가능하도록 플라스틱 기판을 사용하는 것을 목표로, 150℃의 저온에서 기존의 300℃ 공정에 버금가는 TFT 소자를 만들 수 있는 단위막 특성을 얻기 위한 연구를 진행하였다. 증착온도를 150℃로 고정하고 각종 증착 계수를 변경시켜 박막의 특성변화를 분석하여 기존의 고온 공정에서 제작된 박막의 특성과 유사한 수준을 얻을 수 있었다. 이 연구에서 사용된 방법은 기존의 AMLCD공정에 널리 사용되고 있는 PECVD법 이었고, 사용된 가스도 비정질 규소 및 비정질 질화규소 박막의 제작에 널리 사용되고 있는 물질이었다. 이렇게 통상적인 방법과 물질을 이용하여 플라스틱 기판에 적용 가능한 저온에서 양질의 박막을 얻음으로써, 기존 생산시설에 추가적인 투자를 최소화한 상태에서 미래형 기술인 플렉시블 디스플레이의 연구 및 제작을 가능하게 하는데 기여할 수 있다.

참고문헌

- [1] R. A. Street, Hydrogenated Amorphous Silicon, Cambridge University Press, pp. 375, 1991.
- [2] C. Van Berkel, Amorphous and Microcrystalline Semiconductor Devices Volume II Materials and Device Physics, ed. J. Kanichi, Artech House, pp. 412, 1992.
- [3] TFT & LCD, 북스힐, 이충훈 역, pp. 73-80, 2000.
- [4] R. Collins, "Roll-up Displays: Fact or Fiction?", IEE Review, pp. 42-45, 2003, 2.
- [5] H. Sato, et al., "A Process for Fabricating Flexible Reflective Display Devices Using a Composite Film of Ferroelectric Liquid Crystal and Polymer", Electronics and Communications in Japan, Part 2,

- Vol. 90, No. 2, pp. 195-201, 2007.
- [6] Jin Jang, "Displays Develop a New Flexibility", *Materials Today*, Vol. 9, No. 4, pp. 46-52, 2006.
- [7] W. A. MacDonald, "Engineered Films for Display Technologies", *J. Mater. Chem.*, Vol. 14, No. 1, pp. 4-10, 2004.
- [8] W. A. MacDonald, "Plastic Displays - New Developments in Polyester Film for Plastic Electronics", *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, pp. 264-267, 2003.
- [9] L. Teng and W. A. Anderson, "Thin-Film Transistors on Plastic and Glass Substrates Using Silicon Deposited by Microwave Plasma ECR-CVD", *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 24, No. 6, pp. 399-401, 2003.
- [10] J. P. Condea, et al., "Amorphous and Microcrystalline Silicon Deposited by Hot-wire Chemical Vapor Deposition at Low Substrate Temperatures: Application to Devices and Thin-film Microelectromechanical Systems", *Thin Solid Films*, Vol. 395, pp. 105-111, 2001.
- [11] C. Longeaud, et al., "Properties of a New a-Si:H-like Material: Hydrogenated Polymorphous Silicon", *J. Non-Cryst. Solids*, Vol. 227-230, pp. 96-99, 1998.
- [12] İ. AY and H. Tolunay, "Optical Transmission Measurements on Glow-Discharge Amorphous Silicon Nitride Films", *Turk J Phy*, Vol. 25, pp. 215-222, 2001.
- [13] TFT & LCD, 북스힐, 이충훈 역, pp. 132, 2000.
- [14] Y. Kuo, "PECVD Silicon Nitride as a Gate Dielectric for Amorphous Silicon Thin Film Transistor Process and Device Performance", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 142, pp. 186-190, 1995.
- [15] Y. Kuo, "Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposited Silicon Nitride as a Gate Dielectric Film for Amorphous Silicon Thin Film Transistors-a Critical Review", *Vacuum*, Vol. 51, pp. 741-746, 1998.
- [16] M. J. A. de Dood, et. al., "Amorphous Silicon Waveguides for Microphotonics", *J. Apl. Phys.*, Vol. 92, pp. 649-653, 2002.
- [17] R. A. Street, *Hydrogenated Amorphous Silicon*, Cambridge University Press, pp. 44-61, 1991.

이 호 년(Ho-Nyeon Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대학교 원자핵 공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 한국과학기술원 물리학과 (이학석사)
- 1997년 8월 : 한국과학기술원 물리학과(이학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 전자정보공학과 전임강사

<관심분야>

디스플레이 소자, 박막 반도체